



GRADO EN CIENCIAS DEL MAR

DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**ESTUDIO DE LA CIRCULACIÓN SUPERFICIAL
DEL GOLFO DE CÁDIZ A PARTIR DE DATOS
ALTIMÉTRICOS**

AUTOR: Roberto Mulero Martínez

CURSO ACADÉMICO: 2017-2018

TUTOR: Jesús Gómez-Enri



“Más allá de todas las cosas está el océano”

Séneca

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS

RESUMEN

ABSTRACT

LISTA DE ABREVIATURAS

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación del tema y objetivos.....	1
1.2. Altimetría desde satélite.....	2
1.3. Corriente geostrófica a partir de datos altimétricos.....	3
1.4. CryoSat-2.....	4
2. MATERIAL Y MÉTODOS.....	6
2.1. Área de estudio.....	6
2.2. Datos altimétricos.....	7
2.3. Datos de temperatura SST.....	8
2.4. Metodología.....	9
2.4.1. Edición de los datos originales.....	9
2.4.2. Cálculo de MDT, ADT y SAGC.....	10
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	12
3.1. Validación de los datos de ADT generados.....	12
3.2. Circulación superficial del Golfo de Cádiz.....	15
3.3. Otras observaciones.....	19
4. CONCLUSIONES.....	21
5. REFERENCIAS.....	23
6. ANEXOS.....	26

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a mi tutor Jesús Gómez-Enri el tiempo invertido y la paciencia, ya que incluso en la distancia estuvo presente cuando fue necesario. Además de darme la oportunidad de conocer el mundo de la altimetría oceanográfica de cerca.

Me gustaría agradecer también a mis compañeros del grado, ya que siempre han sido un apoyo y casi una familia durante estos últimos cuatro años; así como a todos los profesores e investigadores que han colaborado en mi formación.

Por último, agradecer a mis padres, hermanos y personas más especiales y cercanas de mi vida el apoyo y esfuerzo incondicional que siempre me han mostrado y sin el que no habría sido capaz de llegar a ser quien soy.

RESUMEN

Las corrientes geostróficas superficiales, resultado del balance entre la fuerza de Coriolis y los gradientes de presión en la superficie del océano, son uno de los factores principales de la circulación oceánica. El conocimiento de estas corrientes en zonas costeras es fundamental para entender la circulación en las capas superiores del océano y, por tanto, la dinámica de los sistemas biogeoquímicos. Sin embargo, a pesar de que las medidas altimétricas han sido usadas para aplicaciones oceanográficas desde hace más de 20 años, las zonas costeras han sido menos estudiadas, debido al problema que supone la cercanía a la costa. Los avances en los sensores altimétricos como SIRAL han creado la oportunidad de conocer de forma más exacta la circulación en zonas de este tipo. Por ello, en el presente trabajo se desarrolla una metodología de edición e interpretación de los datos altimétricos obtenidos del sensor SIRAL a bordo del satélite CryoSat-2, con la finalidad de estudiar la circulación superficial en el Golfo de Cádiz, así como las posibilidades que ofrecen estos datos para el estudio de otras estructuras oceánicas de mesoescala.

ABSTRACT

Surface geostrophic currents are the result of the balance between the Coriolis force and the pressure gradient along the ocean surface and they comprise a large portion of the oceanic circulation. It is essential to understand how these currents work, as it is basic for understanding the upper circulation of the ocean and consequently, the dynamics of the linked biogeochemical systems. Altimetric measurements have been used for oceanographic applications for more than 20 years; however, coastal areas have been poorly studied than open ocean due to the problem of the proximity to the coast. Advances in altimetric sensors such as SIRAL create the opportunity to extend and improve the knowledge of ocean circulation in this kind of areas. Therefore, the present project develops a methodology with the aim of editing and interpreting altimetric data obtained from the SIRAL sensor on board the satellite CryoSat-2, in order to study the circulation of the Gulf of Cadiz. At the same time, it shows whether these data can be used to find out other mesoscale oceanic structures.

LISTA DE ABREVIATURAS

ADT: Absolute Dynamic Topography (topografía dinámica absoluta).

CSM: Cabo de Santa María.

DRG: Desembocadura río Guadalquivir.

EGM2008: Earth Gravitational Model 2008 (modelo gravitacional de la Tierra (Geoide) de 2008).

ESA: European Space Agency (agencia Espacial Europea).

MDT: Mean Dynamic Topography (topografía dinámica media).

L2/L3: Level 2, Level 3 (niveles de procesamiento 2 y 3).

LOESS: Locally Weighted Scatterplot Smoothing (filtro de regresión local).

LRM: Low Resolution Mode (modo de baja resolución).

Meddies/Meddy: Mediterranean water eddies/eddy (eddies/eddy de agua mediterránea).

MSS: Mean Sea Surface (nivel medio del mar).

MU: Mediterranean Undercurrent (corriente subsuperficial mediterránea).

OI: Optimal Interpolation (interpolación óptima).

SAGC: Surface Absolute Geostrophic Current (corriente geostrófica superficial absoluta).

SAR: Synthetic Aperture Radar (radar de apertura sintética).

SARin: Synthetic Aperture Radar Interferometric (radar interferométrico de apertura sintética).

SIRAL: SAR/Interferometric Radar ALtimeter (altímetro radar interferométrico de apertura sintética).

SLA: Sea Level Anomaly (anomalía del nivel del mar).

SST: Sea Surface Temperature (temperatura superficial del mar).

WGS84: World Geodetic System 1984 (sistema geodésico global de 1984).

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Justificación del tema y objetivos

De forma general, los patrones de circulación oceánica global se conocen con bastante profundidad, en gran parte gracias a los sistemas de teledetección que permiten el estudio de la variabilidad superficial a gran escala. Sin embargo, la dinámica oceánica en zonas costeras y subcuencas menores conlleva una mayor dificultad debido a la menor escala de sus estructuras y a las dificultades técnicas que implica la cercanía a costa a la hora de interpretar datos de sistemas remotos como los altímetros. Además, la circulación en estas zonas, como el Golfo de Cádiz, se ve influida por multitud de procesos como cambios en el campo de vientos, topografías del fondo abruptas, descargas de ríos e interacciones entre diferentes masas de agua en zonas de poca extensión. Como respuesta a la acción de estos factores, las capas superficiales presentan rápidos cambios en la dinámica a través de eventos como eddies, frentes, afloramientos y ondas internas (Barale et al., 2010). Teniendo en cuenta que la productividad de los ecosistemas marinos está controlada por condiciones ambientales físico-químicas, fuertemente alteradas por estructuras y eventos oceánicos como los mencionados previamente (Prieto et al., 2009), el conocimiento de los patrones de circulación en cuencas menores como el Golfo de Cádiz es de gran interés tanto científico como económico.

Los avances tecnológicos en los altímetros de satélites como CryoSat-2, permiten la obtención de medidas con alta resolución espacial a lo largo de la traza (pasada) del satélite, por lo que resultan herramientas idóneas para el estudio de la dinámica de zonas costeras, como demuestran estudios previos realizados en el Mediterráneo (Morrow et al., 2017).

Teniendo en cuenta lo expuesto previamente, parece lógica la idea de aplicar medidas altimétricas al estudio de la variabilidad oceánica superficial del Golfo de Cádiz, objetivo general del presente trabajo. De esta forma se pretende contribuir además a uno de los retos de la altimetría para la presente década, alcanzar un nivel de entendimiento de la dinámica en zonas costeras igual al que se tiene del océano abierto (Troupin et al., 2014), a partir del desarrollo de metodologías de edición de las medidas originales y su interpretación en estas zonas.

Con dicho propósito, en este estudio se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología básica de interpretación de datos altimétricos para el estudio de la circulación geostrófica superficial.
- Demostrar las capacidades de los datos altimétricos obtenidos a 20Hz (frecuencia de muestreo: 20 medidas por segundo) para el estudio de estructuras oceánicas de mesoescala en zonas costeras.
- Analizar los patrones de circulación en el Golfo de Cádiz.

1.2. Altimetría desde satélite

Los radares altimétricos a bordo de satélites son instrumentos activos que emiten pulsos de ondas electromagnéticas intermitentes hacia la superficie del océano y generan información sobre esta a partir del eco devuelto. La finalidad principal de la altimetría desde satélite es la observación de la topografía del océano para la investigación de la circulación oceánica superficial. Sin embargo, del análisis de la señal generada, conocida como “waveform”, es posible extraer información de algunas variables relacionadas con el estado del mar, entre ellas la altura de ola significativa, la altura del nivel del mar y la velocidad del viento en superficie. En la actualidad, el uso de la altimetría se ha extendido hacia el estudio de otros campos relacionados con el océano, como el estudio de la cubierta de hielo en zonas polares y los glaciares desprendidos de estas, así como el estudio de aguas continentales.

El tiempo de viaje de ida y vuelta del pulso, desde que es emitido hasta que se recibe su reflejo, da una estimación muy precisa de la distancia entre el satélite y la superficie oceánica. Esta distancia (*altimeter range* en la Figura 1) varía en el espacio y el tiempo debido a dos factores, la variabilidad de la superficie marina y la distancia del satélite al centro de masas de la Tierra, es decir, su órbita (*satellite orbit height* en la Figura 1). Teniendo en cuenta que los pulsos emitidos no viajan por el vacío, la obtención de la distancia precisa entre el satélite y la superficie observada, requiere de una serie de correcciones que tengan en cuenta la presencia de las variaciones de la velocidad de la luz al atravesar capas como la ionosfera y la troposfera (Figura 1). Una vez aplicadas dichas correcciones, es posible el cálculo de diferentes variables de interés a partir de las

relaciones entre la altura del geoide (h_g), la órbita (H), la distancia (R), el nivel medio del mar (MSS) y el elipsoide de referencia (Pinardi et al., 2017).

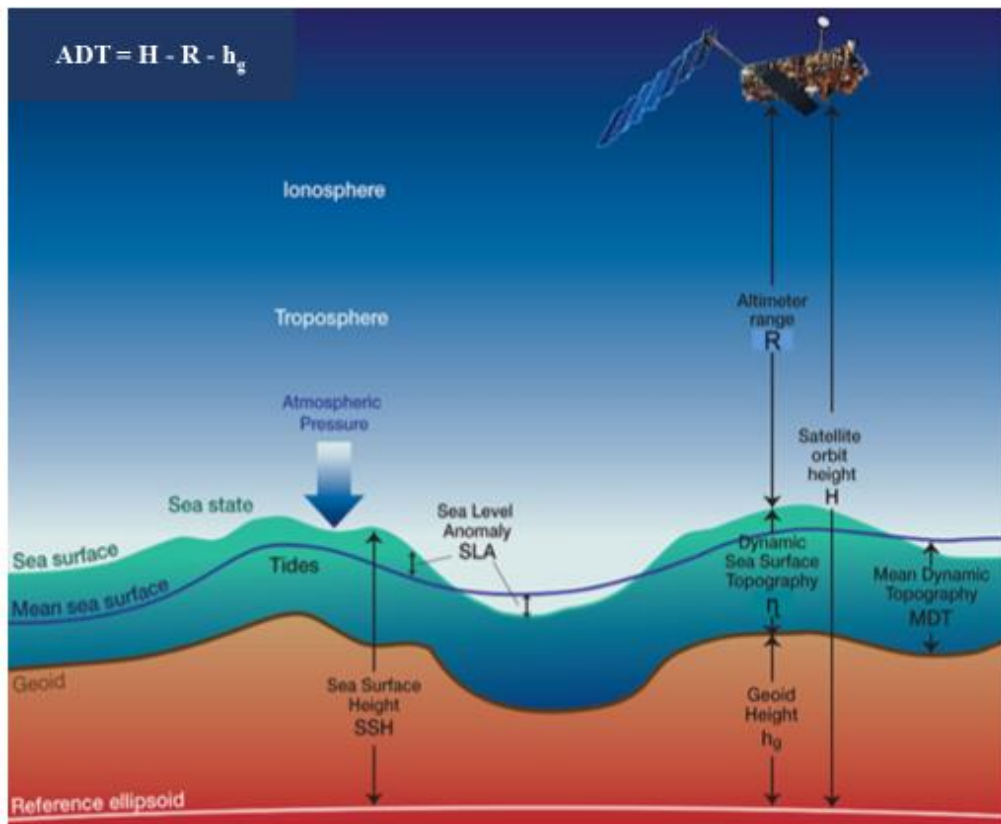


Figura 1. Esquema de la relación entre las distintas variables implicadas en el estudio de la superficie oceánica desde datos altimétricos y fórmula para el cálculo de la topografía dinámica de la superficie del mar (ADT). Fuente: <http://www.learn-eo.org/resources.php>

1.3. Circulación geostrófica a partir de datos altimétricos

Las corrientes horizontales en superficie son generadas por intercambios de energía en diferentes formas en la interfaz aire-océano. Estos intercambios pueden ser observados indirectamente mediante medidas obtenidas a partir de teledetección (nivel del mar, temperatura superficial del mar, rugosidad de la superficie del mar). A partir de dichas medidas, es posible obtener variables de gran interés para la oceanografía, como son la topografía dinámica media (MDT) y la anomalía del nivel del mar (SLA). Estas variables hacen referencia a una distribución de las masas de agua, inducida por el campo gravitacional terrestre, tomando como referencia un estado de equilibrio. El interés de estas variables reside en que constituyen la media y las variaciones temporales, respectivamente, de la topografía dinámica absoluta (ADT), la cual es la señal dinámica

que representa el desplazamiento con respecto a la superficie equipotencial (geoide) forzado por las interacciones con la atmósfera y los contornos topográficos del fondo y los laterales (Pinardi et al., 2017).

La corriente geostrófica resulta del equilibrio entre los gradientes de presión y los términos de Coriolis, y constituye uno de los agentes principales de circulación en el océano. Estos gradientes de presión son generados por diferencias en el nivel del mar, que a su vez tienen su origen en distintos fenómenos derivados de la interacción atmósfera-océano.

A continuación, se muestra cómo a partir del ADT, que de forma simplificada representa el nivel del mar sobre un hipotético mar en calma (geoide), es posible calcular la corriente geostrófica absoluta superficial (SAGC).

Desde un punto de vista oceanográfico, en un eje de coordenadas cartesianas en el que el eje x apunta al este, el y al norte y el z en la dirección opuesta a la fuerza de la gravedad, las componentes zonal y meridional de la corriente geostrófica (u y v) pueden derivarse a partir de la Ecuación 1, asumiendo que la densidad del agua es constante (Yu et al., 2014).

$$\begin{cases} u = -\frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial y} = -\frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial y} \\ v = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial x} = \frac{g}{f} \frac{\partial h}{\partial x} \end{cases}$$

Ecuación 1. Ecuaciones para el cálculo de las componentes u y v de la corriente geostrófica, en la que g es la constante gravitacional, ρ es la densidad del agua, p es la presión, f es el parámetro de Coriolis ($f = 2\Omega \sin\varphi$, siendo Ω la velocidad angular de rotación de la tierra y φ la latitud) y h es el ADT.

1.4. CryoSat 2

En este estudio, los datos altimétricos utilizados proceden del altímetro a bordo del satélite CryoSat-2. Se trata de una misión de la Agencia Espacial Europea (ESA) con la finalidad de monitorizar las variaciones en el grosor de las cubiertas de hielo oceánica y continentales. La plataforma CryoSat-2 fue lanzada el 8 de abril de 2010 para reemplazar al satélite CryoSat original, el cual se perdió durante su lanzamiento en octubre de 2005.

CryoSat-2 orbita a una altura de unos 717 km, tiene un ciclo de repetición de 369 días y gracias a la inclinación de su órbita, de 92°, alcanza latitudes de 88°. El principal

instrumento a bordo de CryoSat-2 es el altímetro radar interferométrico de apertura sintética (SIRAL), que opera en tres modos diferentes, dependiendo de la zona terrestre que esté sobrevolando, asociada al tipo de observación requerida (Figura 2). Los diferentes modos de funcionamiento del SIRAL son “low resolution mode” (LRM), “synthetic aperture radar” (SAR) y “synthetic aperture radar interferometric” (SARin).

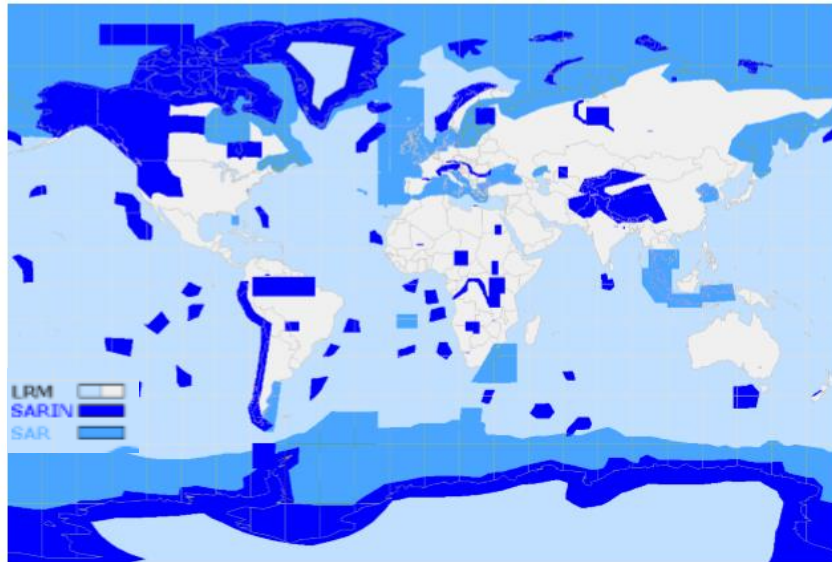


Figura 2. Distribución geográfica de los diferentes modos en los que trabaja el altímetro a bordo del satélite CryoSat-2 para el periodo de estudio. Fuente: <https://earth.esa.int/web/guest/-/geographical-mode-mask-7107>

Como puede apreciarse en la Figura 2, en la zona de estudio (Golfo de Cádiz), el modo de trabajo del SIRAL es SAR. Dicho modo del altímetro fue diseñado inicialmente para la obtención de medidas de alta resolución de fragmentos de hielo flotantes. Sin embargo, también se utiliza para la obtención del nivel del mar en algunas zonas del planeta. Para dicha finalidad, los productos derivados de las medidas altimétricas son generados a una frecuencia de 20Hz, dando lugar a medidas cada 380 m a lo largo de la traza (ESA, 2018).

Cabe destacar que, para estudios de zonas costeras, concretamente para el Golfo de Cádiz, productos derivados de medidas del altímetro a bordo de CryoSat-2, como la anomalía del nivel del mar (SLA), han sido validados con éxito en estudios previos, como el llevado a cabo por Gómez-Enri et al. (2018).

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Área de estudio

El Golfo de Cádiz es una subcuenca del Atlántico Norte, cuyos límites generalmente establecidos son la costa suroccidental de la Península Ibérica, el Estrecho de Gibraltar y la costa atlántica de Marruecos (Criado-Aldeanueva et al., 2006) (Figura 3a). Sin embargo, en este trabajo, el estudio se ha llevado a cabo en una cuenca más acotada, ya que se buscaba el análisis de mesoescala de la corriente geostrofica en la zona más cercana a la costa. La zona en cuestión queda delimitada por el Cabo de Santa María (CSM), la desembocadura del río Guadalquivir (DRV) y el paralelo 36°N (Figura 3b).

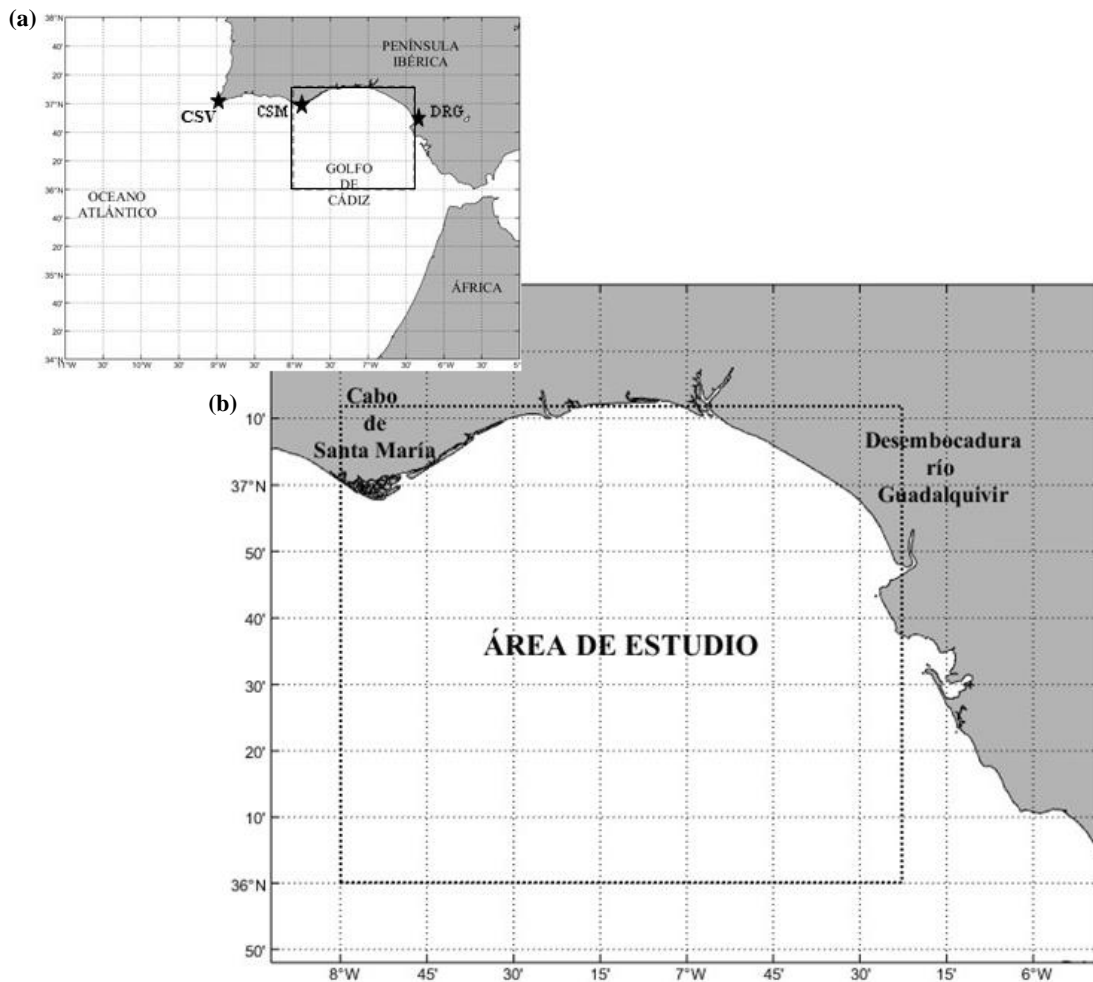


Figura 3. (a) Localización geográfica del Golfo de Cádiz (CSV: Cabo San Vicente; CSM: Cabo de Santa María; DRV: Desembocadura Río Guadalquivir). (b) Área de estudio.

Desde el punto de vista de la Oceanografía, el Golfo de Cádiz es un lugar de gran interés debido a la complejidad de su dinámica. En primer lugar, constituye una zona de intercambio de masas de agua con el Mediterráneo a través del Estrecho de Gibraltar, hecho que influye de forma importante en la circulación local, principalmente debido a la generación de la corriente intermedia-profunda de agua mediterránea (MU) y de eddies mediterráneos (Meddies). Además, en el otro extremo del Golfo, se desarrollan estructuras como chorros y filamentos de aguas profundas, asociadas a eventos de *upwelling* en los cabos de San Vicente (CSV) y Santa María (CSM). Por otra parte, los abruptos cambios en la orientación de la línea de costa y la presencia del ya mencionado Estrecho de Gibraltar conectando dos cuencas tan diferentes, favorecen la existencia de un régimen de vientos muy heterogéneo, que en gran parte condiciona la circulación superficial (Peliz et al., 2007). Además de estos factores principales, otros agentes como las descargas de los ríos Guadiana y Guadalquivir tienen efectos sobre la temperatura superficial, la salinidad y otras variables biogeoquímicas, llegando incluso a influir en la circulación superficial en la zona más cercana a costa (Laiz et al., 2013).

2.2. Datos altimétricos

El estudio se ha llevado a cabo a partir de datos obtenidos por el altímetro a bordo del satélite CryoSat-2, en modo SAR, en el periodo comprendido entre 2011 y 2015. Los datos de partida fueron generados por la plataforma “CryoSat-2 SARvatore Software at ESA/ESRIN” y descargados de la web de la Agencia Espacial Europea “Grid Processing On Demand” (GPOD, https://gpod.eo.esa.int/catalogue/SIR1SAR_FR). Cada fichero (de datos (con formato NetCDF) correspondiente a las diferentes trazas contiene las variables originales que se muestran en el Anexo 2a. Durante el proceso de estudio se han analizado un total de 88 trazas o pasadas del satélite, distribuidas a lo largo de la zona y el período de estudio (Figura 4).

Todas las trazas utilizadas en el presente trabajo son descendentes, ya que se han buscado aquellas lo más perpendiculares a la línea de costa para evitar excesiva contaminación de los datos por la cercanía a tierra. Además, teniendo en cuenta el contorno de la zona de estudio, esta orientación de las trazas permitirá una mejor interpretación de los resultados, ya que la corriente geostrófica resultante y normal a las trazas, será prácticamente paralela a la línea de costa.

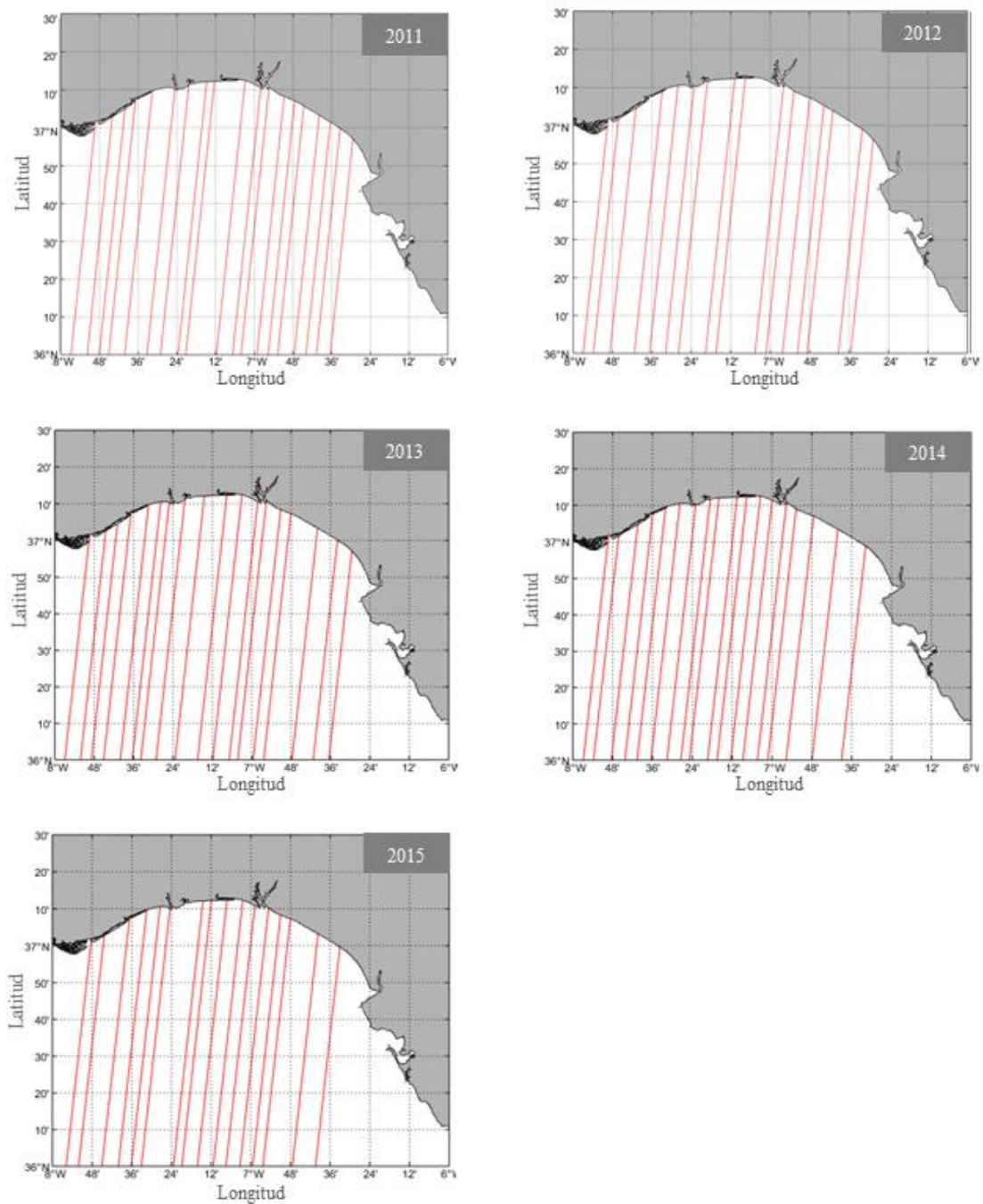


Figura 4. Trazas de CryoSat-2 sobre la zona de estudio, para los diferentes años del periodo de estudio, utilizadas en el presente trabajo.

2.3. Datos de temperatura SST

Además de los datos previamente explicados, se han utilizado datos de temperatura superficial del mar (SST) para una mejor interpretación de los resultados obtenidos a partir de las medidas altimétricas.

Los datos de SST, de nivel 4 de procesamiento, con resolución espacial 0.0417° latitud x 0.0417° longitud y resolución temporal diaria, fueron obtenidos de la plataforma “Copernicus Marine Environment Monitoring Service” (CMEMS, <http://marine.copernicus.eu>). Dichos datos proceden de la interpolación óptima (IO) de medidas nocturnas de SST tomadas por radiómetros de infrarrojos a bordo de diferentes satélites (Pisano et al., 2016). El producto obtenido de esta forma tiene la ventaja de no presentar zonas sin datos por la presencia de nubes, problema común en las medidas procedentes de sensores de infrarrojos.

Cada uno de los ficheros correspondientes a los diferentes días contenían las variables originales que se muestran en el Anexo 2b.

2.4. Metodología

2.4.1. Edición de los datos originales

Los datos altimétricos utilizados derivan de pasadas del satélite que proceden de tierra (descendentes), por lo que las primeras medidas de cada traza en la zona de estudio presentan altos niveles de ruido debido a su cercanía a tierra firme (Bouffard et al., 2008). Estos altos niveles de ruido podrían generar valores anómalos de SLA y posteriormente de la corriente geostrófica calculada a partir de esta. Para editar los datos originales y acabar con este problema, se ha seguido la metodología propuesta por Bouffard et al. (2010), basada en la suposición de que las medidas que se desvían de los valores medios deben estar distribuidas e ir variando de forma uniforme a partir de la fuente de ruido, es decir, de la costa. Para determinar qué datos son anómalos se establece un rango de desviación de la media, que en esta metodología se propone que sea tres veces la desviación estándar (3σ) a lo largo de los valores de SLA en cada traza, de forma que los valores superiores, en valor absoluto, al límite establecido, sean considerados anómalos y eliminados. Este proceso es iterativo y se utiliza en un bucle que es repetido 10 veces. Este método de detección de valores anómalos se aplica a los 100 primeros valores de cada traza, es decir, a los primeros 33 kilómetros de medidas más cercanos a costa. Una vez finalizado el proceso, el valor siguiente al último eliminado será el primero de la nueva SLA editada y sin ruido.

El siguiente paso en el proceso de edición de los datos originales es proceder al suavizado de las medidas de SLA, ya que al proceder de un altímetro que opera a 20Hz, son tomadas cada 0.33km, por lo que las estructuras de mesoescala, en las cuales se centra el estudio quedan en ordenes de magnitud superiores. Para adaptar los datos a las necesidades previamente comentadas, se ha aplicado un filtro de regresión local o LOESS de 50 km de corte, ya que un filtro de estas características sería adecuado para medidas tomadas por CryoSat-2 en modo SAR, para estudiar fenómenos de mesoescala en las distintas estaciones del año, tal y como se propone en Morrow et al. (2017) (Figura 5).

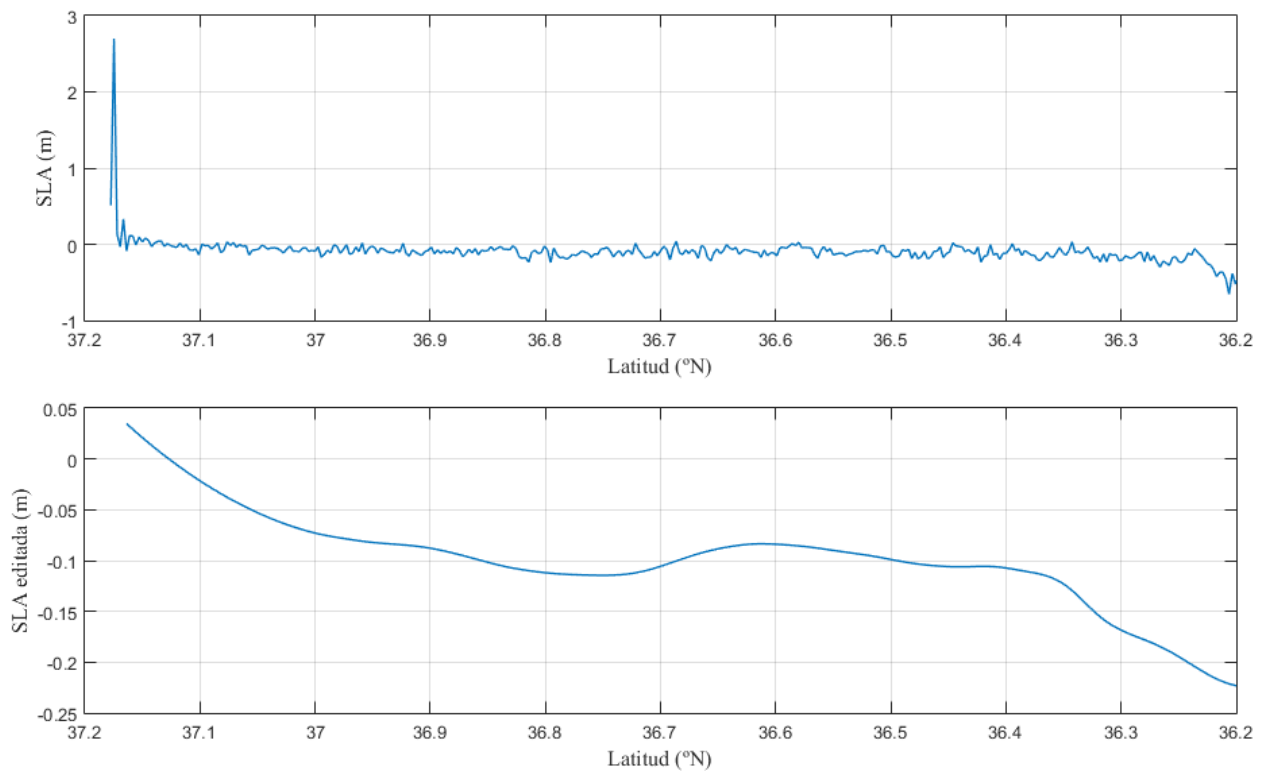


Figura 5. Comparación entre los valores de SLA original y SLA editada para eliminar el ruido por cercanía a la costa y filtrada para adaptarla al estudio de estructuras de mesoescala.

2.4.2. Cálculo de MDT, ADT y SAGC

Una vez editados los datos de SLA, se procede al cálculo de ADT, necesario para posteriormente generar los datos de corriente geostrófica. El ADT es calculado como la suma de MDT y SLA, por lo que también es necesario el cálculo de MDT (Figura 6).



Figura 6. Esquema del proceso de edición de los datos originales y cálculo de MDT y ADT. Fuente: elaboración propia.

Para obtener el MDT se ha restado a los valores de MSSH las medidas del geoide EGM 2008 en cada punto. Una vez generado el MDT, el ADT es obtenido como la suma del SLA ya editado y el MDT (Rio et al., 2007).

La corriente geostrófica absoluta superficial perpendicular a cada traza (SAGC), es calculada a partir de la Ecuación 2 (modificado de Bouffard et al., 2010), obtenida a partir de la Ecuación 1.

$$V_g = \frac{-g}{f} \frac{\Delta ADT}{\Delta y}$$

Ecuación 2. Ecuación para el cálculo de la SAGC en la que V_g es el valor de la corriente geostrófica perpendicular a la traza, g es la aceleración de la gravedad, f es el parámetro de Coriolis, y es la distancia a lo largo de la traza y ADT es la topografía dinámica absoluta previamente calculada.

Una vez calculado el módulo de la corriente, por el método de diferencias finitas, se han calculado las componentes u y v , a partir del ángulo de inclinación del satélite, que en el caso de CryoSat-2 es de 92° con respecto al ecuador (ESA, 2018), es decir, tiene una desviación de 2° con respecto a los meridianos terrestres. Teniendo en cuenta que las trazas utilizadas son descendentes y utilizando razones trigonométricas (Figura 7) el cálculo de las componentes u y v se ha llevado a cabo mediante la Ecuación 3.

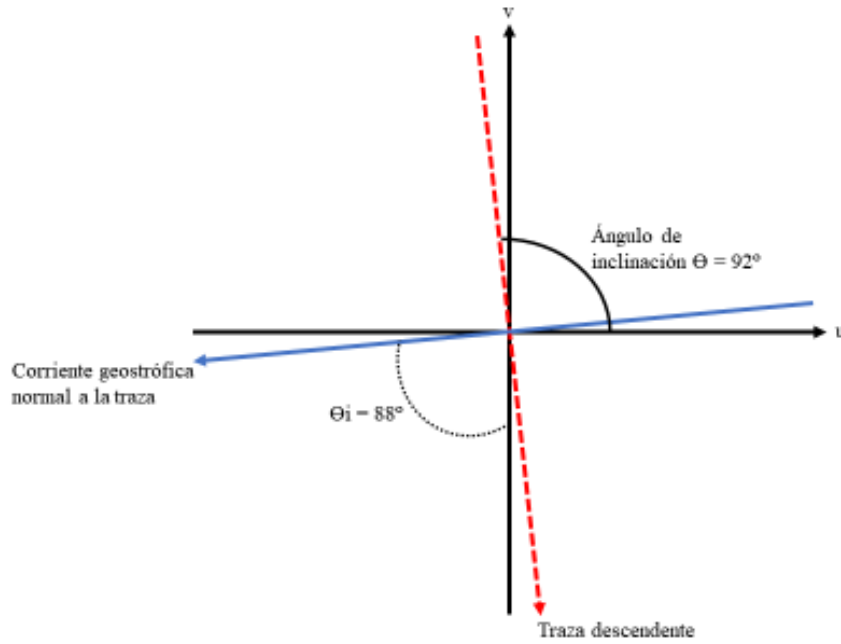


Figura 7. Esquema de la disposición de la corriente geostrófica, normal a la traza del satélite, con respecto a los ejes de coordenadas u y v , en el cual se observan los ángulos necesarios para la extracción de las componentes zonal y meridional del vector corriente geostrófica.

$$\begin{cases} u = -(V_g \cdot \cos(\theta_i)) \\ v = V_g \cdot \sin(\theta_i) \end{cases}$$

Ecuación 3. Ecuación a partir de la cual se extraen las componentes u y v a partir del módulo de la corriente geostrófica y el ángulo de inclinación de esta con respecto a los ejes de referencia.

Toda la metodología explicada se ha desarrollado mediante la elaboración de un código (Anexo 1) usando el programa MATLAB R2015a.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Validación de los datos de ADT generados

La obtención de variables oceanográficas como el ADT, a partir de datos altimétricos, requiere de un proceso de validación para asegurar la veracidad de los datos generados. La forma tradicional e idónea de validación de este tipo de datos es su comparación con medidas de la misma variable tomadas con instrumentación *in situ* y a escalas espacio-temporales de la misma magnitud. Sin embargo, debido a la falta de datos de acceso público de este tipo en la zona de estudio para el periodo 2011-2015, en este trabajo el

proceso de validación ha consistido en un análisis gráfico de los datos de ADT obtenidos, comparados con la interpretación de la temperatura superficial del mar en el Golfo de Cádiz para la misma fecha, ya que los datos de SST proporcionan una visión cualitativa muy acertada sobre los patrones de circulación superficial en el océano (González-Haro & Isern-Fontanet, 2014). Además, las variables SST y ADT están altamente correlacionadas de forma directa, por tanto, zonas con mayor temperatura superficial presentan mayores valores de topografía dinámica absoluta (Buckingham & Cornillon, 2013), siendo las variaciones de densidad del agua, causadas por los cambios en la temperatura, la base de esta relación.

A continuación, se exponen dos ejemplos del tipo de interpretación llevada a cabo para considerar ADT válidos para un estudio cualitativo de la circulación superficial en el Golfo de Cádiz (Figuras 8: 23/07/2012; Figura 9: 19/10/2013). En ambos casos se muestran los valores de ADT a lo largo de trazas de CryoSat-2 en diferentes fechas, coincidiendo además con diferentes estaciones (verano y otoño). Cada traza ha sido representada sobre un mapa de la zona de estudio con los valores de SST correspondientes a la fecha, de forma que pueda determinarse de forma cualitativa si la variación de los datos de ADT se corresponden con las variaciones de SST, siguiendo la relación, previamente expuesta, que existe entre ambos parámetros.

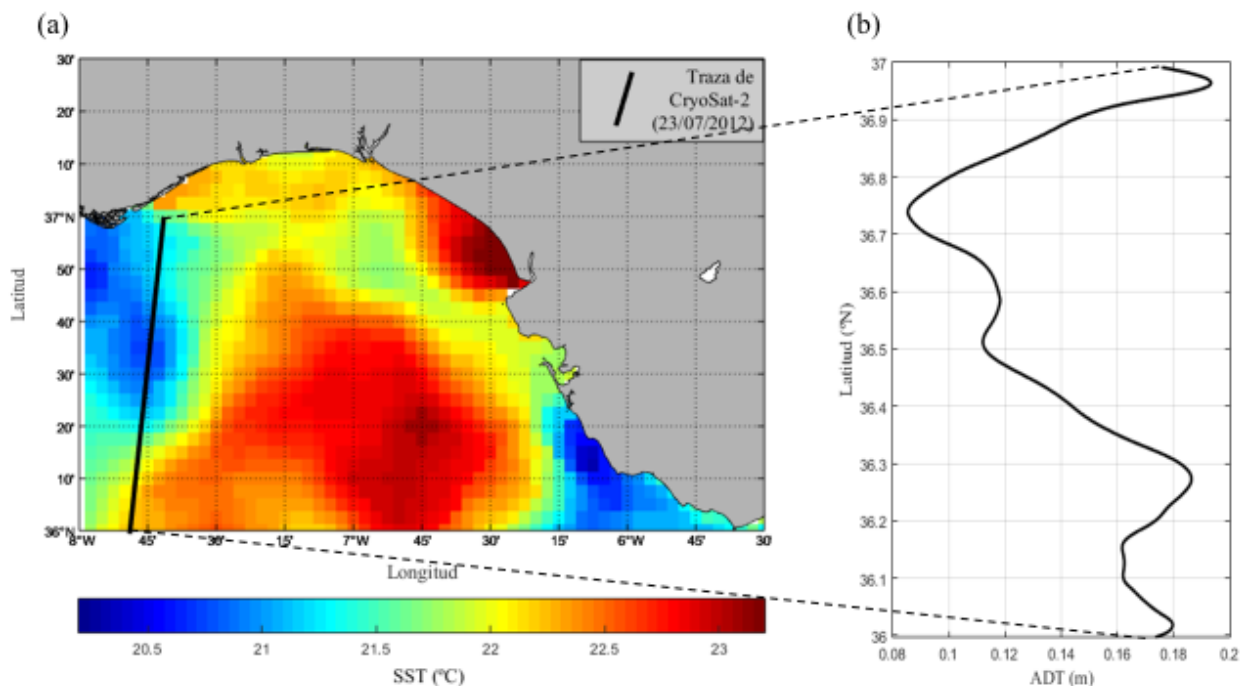


Figura 8. (a) Recorrido de la traza del día 23/07/2012 sobre la zona de estudio y valores de SST. (b) Valores de ADT obtenidos a partir de la traza del día 23/07/2012.

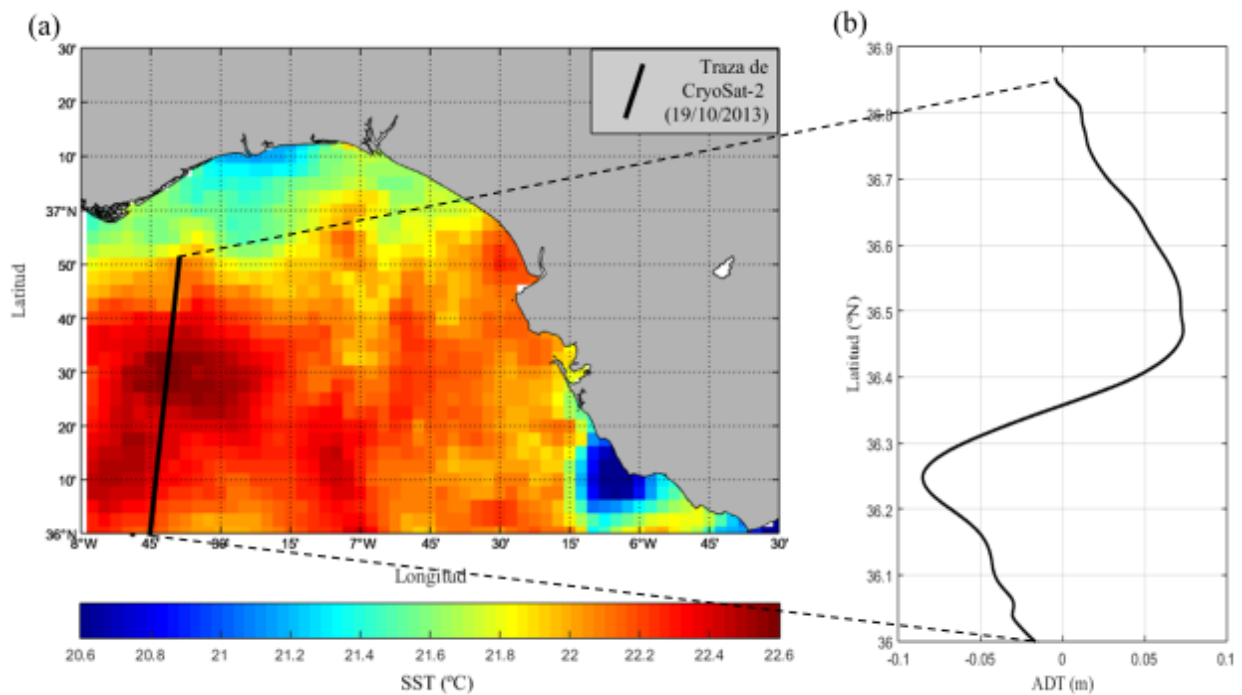


Figura 9. (a) Recorrido de la traza del día 19/10/2013 sobre la zona de estudio y valores de temperatura superficial del mar. (b) Valores de ADT obtenidos a partir de la traza del día 19/10/2013.

En la Figura 8a se aprecia cómo la traza del día 23/07/2012 pasa sobre una zona en la que se aprecian bajas temperaturas del agua en el área del cabo Santa María, donde está teniendo lugar un *upwelling* (Criado-Aldeanueva et al., 2006). Para la latitud coincidente con el *upwelling*, el valor de los datos de ADT disminuye (Figura 8b), de forma que evidencian la presencia de una zona de divergencia de las aguas superficiales, asociada a este tipo de eventos.

A diferencia del caso anterior, en la Figura 9a puede apreciarse que la traza del día 19/10/2013 pasa sobre una zona de convergencia de aguas cálidas, y cómo el valor de los datos de ADT aumenta justo en la zona (Figura 9b), volviendo a disminuir al dejarla atrás y coincidir con temperaturas levemente menores.

Una vez llevado a cabo el análisis gráfico previamente mencionado para las 88 trazas estudiadas, se ha constatado que los datos de ADT generados muestran variaciones coherentes a lo largo de las diferentes trazas al compararlos con los valores de SST. Cabe destacar que los datos de ADT obtenidos permiten apreciar variaciones de menor escala que las que se perciben a partir de los datos de SST, principalmente debido a una resolución espacial más fina de los primeros.

Teniendo en cuenta lo expuesto y el objetivo del estudio, el análisis cualitativo de la circulación superficial del Golfo de Cádiz, se ha determinado que los datos de ADT obtenidos mediante la metodología utilizada pueden ser considerados válidos para dicha finalidad, ya que ofrecen una visión detallada de las variaciones de la superficie oceánica en la zona.

3.2. Circulación superficial en el Golfo de Cádiz

A partir de los datos de SAGC generados mediante la metodología previamente expuesta, ha sido posible observar distintos modos de circulación superficial en el Golfo de Cádiz. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con los datos de SAGC obtenidos a partir del análisis de los datos del satélite CryoSat-2 y los mapas de SST, a partir de los cuales es posible distinguir dos modos de circulación superficial, asociadas al régimen de vientos en la zona. Los datos de SAGC representados en las Figuras 10 y 11 muestran cómo la circulación en la zona más cercana a la costa oriental del Golfo de Cádiz se dirige hacia el oeste principalmente, coincidiendo con aguas superficiales cálidas. La circulación superficial en la zona más meridional, para el caso de la Figura 10, presenta una zona de propagación hacia el este. La parte sur de la Figura 11 presenta una mayor complejidad, ya que se aprecian cambios bruscos en el sentido de la corriente, sin embargo, teniendo en cuenta los datos de SST, puede deducirse que dichos cambios se deben a la alternancia de aguas superficiales de distinta temperatura a lo largo de la traza. Las velocidades observadas en esta figura no superan en ningún caso la velocidad de 1 m/s.

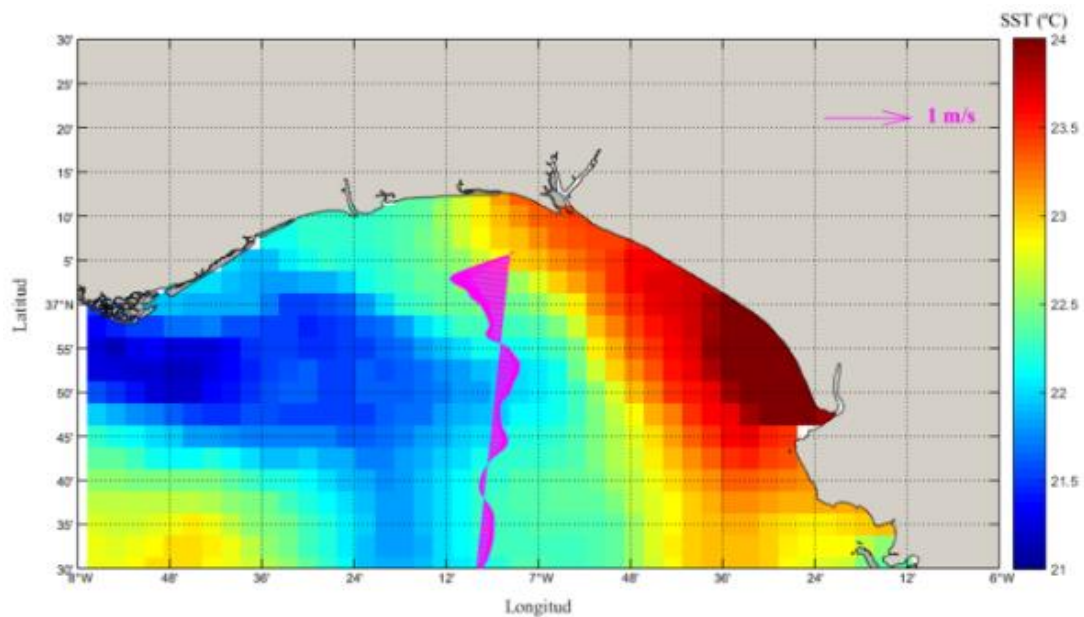


Figura 10. Representación de los valores de SAGC (flechas rosas) para la traza del día 16/08/2011 y valores de SST para el mismo día.

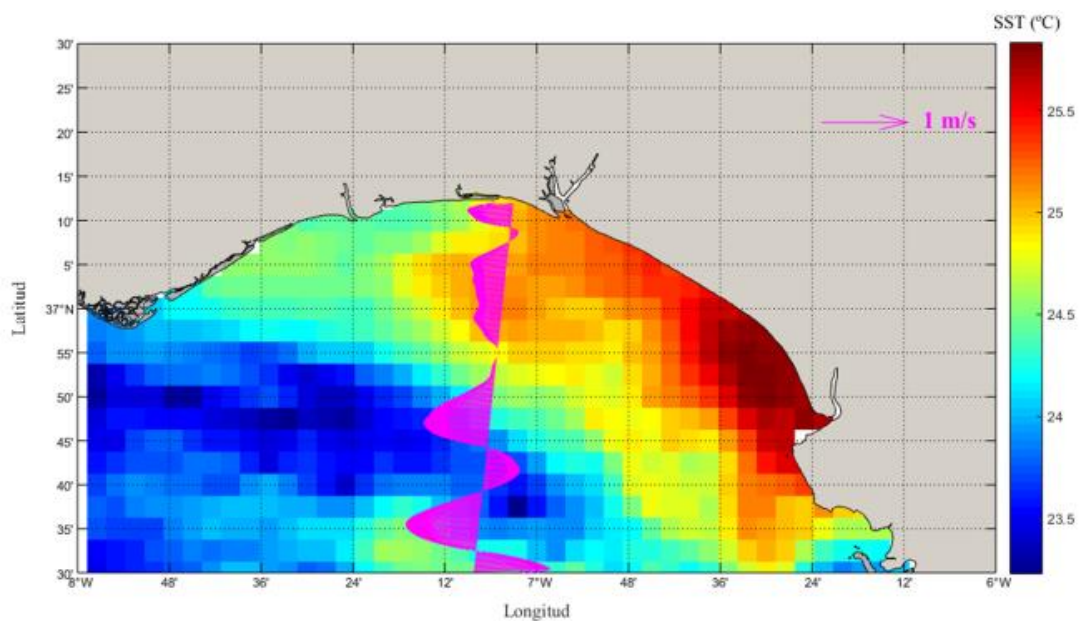


Figura 11. Representación de los valores de SAGC (flechas rosas) para la traza del día 22/08/2013 y valores de SST para el mismo día.

Teniendo en cuenta lo mostrado por los datos de SAGC en las Figuras 10 y 11, así como por los datos de SST, es posible determinar que dichas trazas atravesaron la zona de estudio en un periodo en el que estaba teniendo lugar el modo de circulación superficial ciclónico (Criado-Aldeanueva et al., 2006) (Figura 12). Dicha configuración de la circulación superficial se caracteriza por una contracorriente costera de aguas cálidas que inunda la zona más interna del Golfo de Cádiz, aumentando la temperatura en la zona y

que separa el chorro procedente del *upwelling* del Cabo San Vicente de la costa, redirigiendolo hacia el sureste (Relvas, 2002).

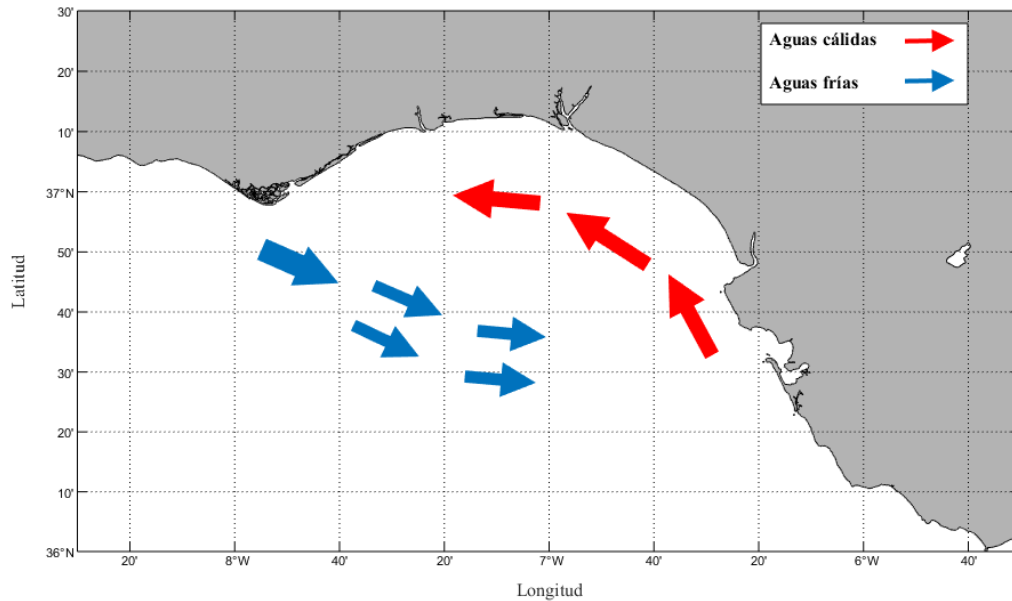


Figura 12. Esquema de la circulación en modo ciclónico en el Golfo de Cádiz. Fuente: elaboración propia.

En las Figuras 13 y 14, los datos de SCGA muestran que la corriente se dirige hacia el este en la zona más cercana a la costa, coincidiendo con aguas superficiales frías, mientras, en la parte más meridional la corriente va en sentido oeste. La representación de los datos de corriente explicados, así como los datos de SST, sugieren que en estas ocasiones las trazas del satélite CryoSat-2 cruzaron el Golfo de Cádiz durante periodos en los que tenía lugar el modo de circulación anticiclónico (Figura 15).

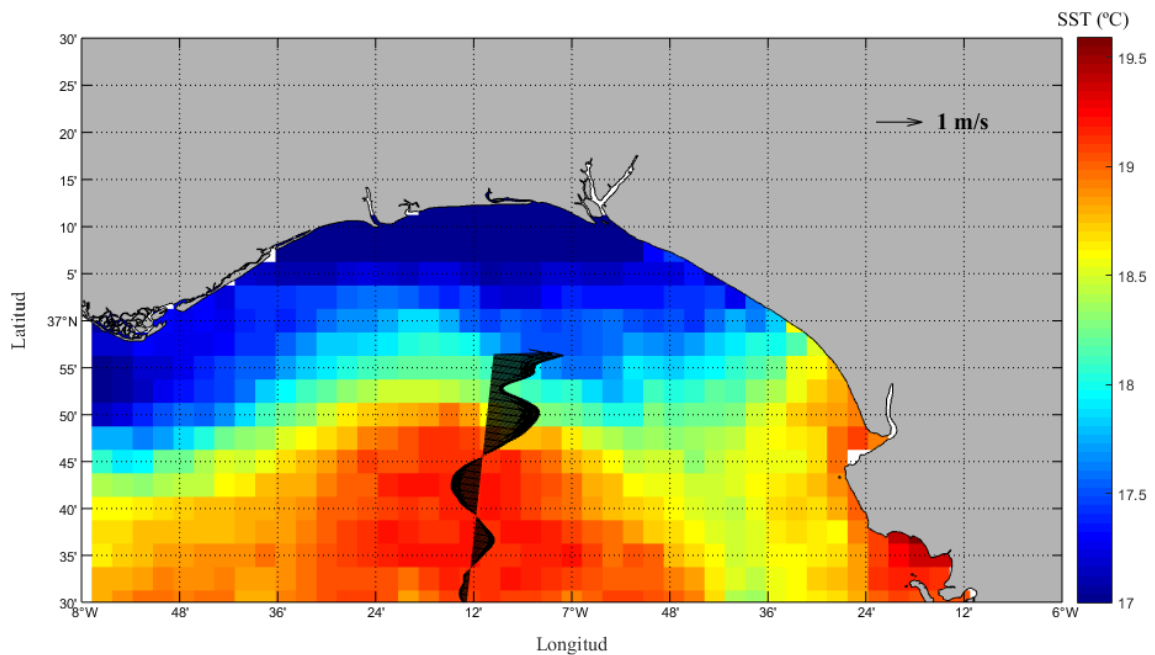


Figura 13. Representación de los valores de SAGC (flechas negras) para la traza del día 01/06/2014 y valores de SST para la misma fecha.

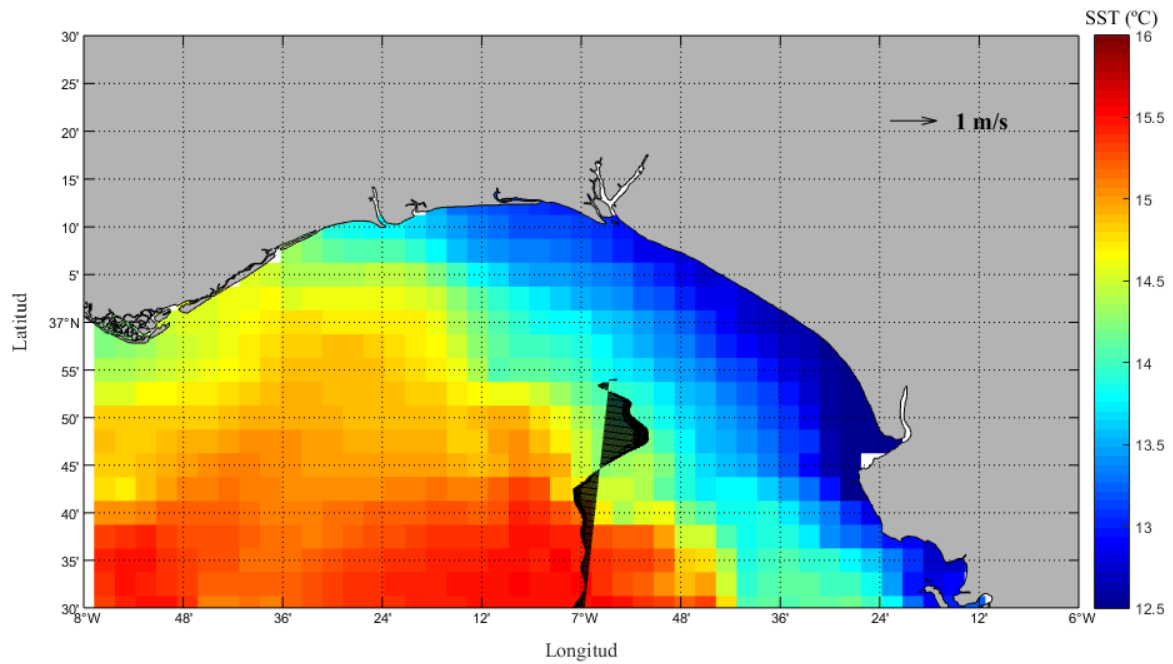


Figura 14. Representación de los valores de SAGC (flechas negras) para la traza del día 11/02/2015 y valores de SST para la misma fecha.

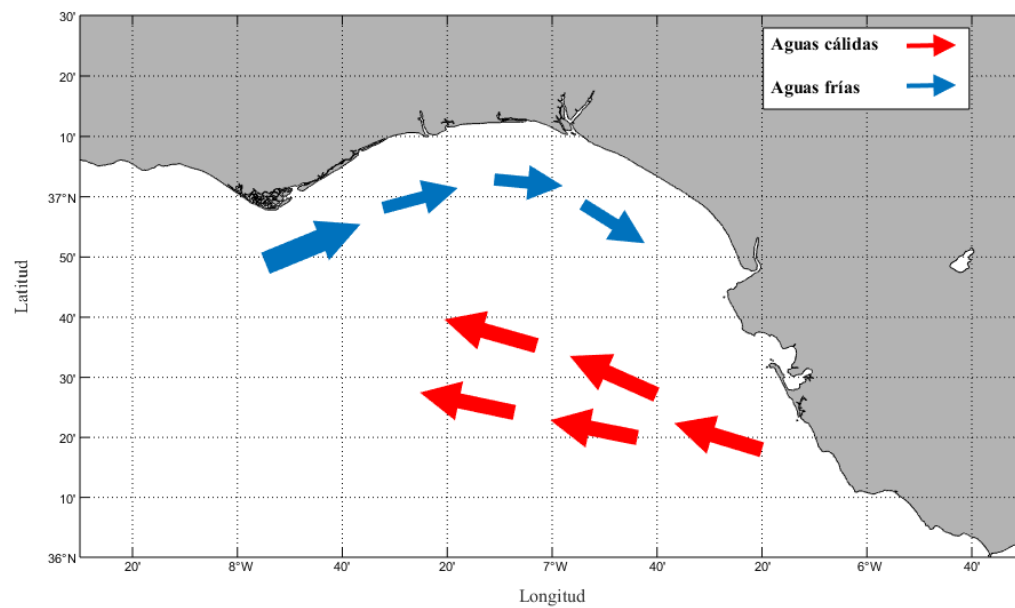


Figura 15. Esquema de la circulación en modo anticiclónico en el Golfo de Cádiz. Fuente: elaboración propia.

Las características de dicho modo son la extensión de las aguas frías procedentes del afloramiento del Cabo San Vicente por la zona costera hasta prácticamente el Estrecho de Gibraltar, mientras que más al sur fluyen aguas de mayor temperatura hacia el oeste

(Criado-Aldeanueva et al., 2006). Este modo de circulación es el predominante durante gran parte del año (Criado-Aldeanueva et al., 2009).

Los diferentes modos de circulación en el Golfo de Cádiz, previamente expuestos, han sido relacionados por varios autores de forma directa con el régimen local de vientos, de forma que la circulación ciclónica se establecía como consecuencia de periodos de levante y el modo anticiclónico y más común con ponientes. Sin embargo, como ya observase Garel et al. (2016), este patrón no siempre se cumple y por tanto, la circulación superficial en la zona no está condicionada únicamente por la tensión del viento en superficie, sino que está más relacionada con condiciones del viento de gran escala. Con respecto a los ejemplos mostrados en este trabajo, la semana previa al 16/08/2011 (circulación ciclónica) hubo predominio de vientos de levante en la zona del Golfo de Cádiz, así como en los días precedentes al 01/06/2014 (circulación anticiclónica) los vientos más comunes fueron ponientes. Sin embargo, esta relación no se cumple para el caso de circulación ciclónica del día 22/08/2013, en el que los vientos eran variables con predominancia de ponientes (<http://www.puertos.es>).

3.3. Otras observaciones

Además de patrones de circulación en la zona, los datos altimétricos utilizados han permitido observar otras estructuras de mesoescala, ya que al haber sido obtenidos a 20Hz tienen una gran resolución espacial a lo largo de las trazas. A continuación, se expone un ejemplo de estructura de mesoescala observada a partir de los datos generados. En la Figura 16 puede apreciarse cómo la traza del satélite pasó sobre una zona en la que los datos de SAGC muestran un cambio brusco en el sentido de la corriente. Al comparar dichos datos con la SST para el mismo lugar y día, se observa que tienen lugar en una zona de convergencia de aguas cálidas. Teniendo en cuenta las características expuestas, se plantea la posibilidad de que dicha estructura sea un eddy, o meddy para el caso que aquí se trata. Los meddies se generan por la interacción de las aguas profundas mediterráneas con el relieve submarino del Golfo bajo determinadas circunstancias y se caracterizan por presentar forma lenticular, rotación anticiclónica, diámetro de entre 50 y 100 km y velocidades de corriente superficial de unos 0.3 m/s (Ambar et al., 2008), características que se dan en la estructura presente en la Figura 16. Para comprobar dicha suposición, se han utilizado representaciones gráficas de datos mallados de SLA

descargados de la plataforma CMEMS. A partir de estas representaciones (Anexo 3) puede observarse cómo una zona de convergencia de aguas (mayores valores de SLA) y por tanto, de vorticidad negativa, procedente del sur del Estrecho de Gibraltar, va bifurcándose a medida que avanza hacia el noroeste y da lugar a dos zonas separadas, con valores de SLA más altos que las zonas aledañas. Una de estas zonas resultantes da lugar a un meddy que se desplaza en dirección al Cabo San Vicente, mientras que la otra va disminuyendo los valores de SLA al acercarse a la costa del Golfo de Cádiz. El límite de esta última, con una zona colindante de divergencia (menores valores de SLA) parece ser la causante del cambio brusco en el sentido de la corriente que se aprecia en la Figura 16.

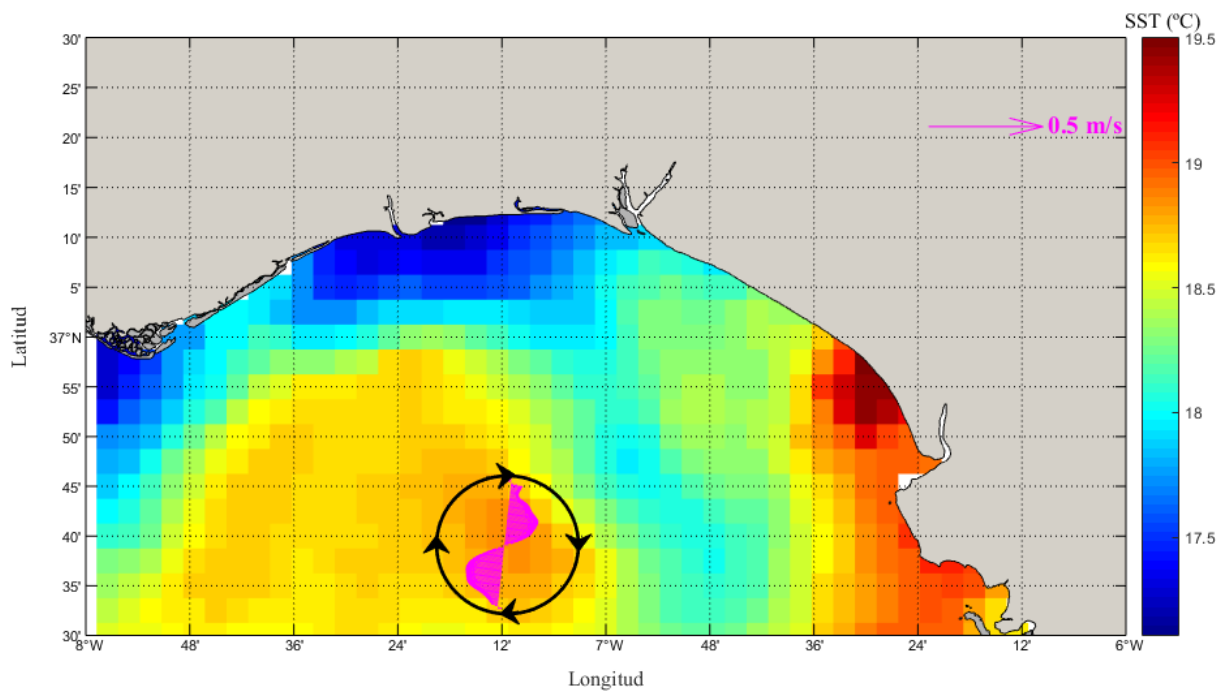


Figura 16. Datos de SAGC (flechas rosas) y de SST para la traza del día 26/05/2012, esquema de circulación de un posible meddy (trazo negro).

4. CONCLUSIONES

En base al estudio de los datos obtenidos a partir de las 88 trazas utilizadas y teniendo en cuenta los objetivos planteados al inicio del trabajo, se establecen las siguientes conclusiones:

- Los productos altimétricos procedentes de medidas tomadas por el sensor SIRAL, a bordo del satélite CryoSat-2 en modo SAR, han resultado ser útiles para el estudio de la circulación superficial en el Golfo de Cádiz, así como para la detección y estudio de diferentes estructuras oceánicas de mesoescala como eddies.
- La orientación de las trazas de CryoSat-2 resulta ideal para el estudio de la circulación geostrófica en el Golfo de Cádiz, ya que al ser prácticamente perpendiculares a la costa es posible la obtención de la corriente paralela a esta.
- La circulación superficial en el Golfo de Cádiz sigue de forma general un patrón bimodal, en el que se alternan circulación ciclónica y anticiclónica, generando cada uno de los modos diferentes distribuciones de las masas de agua en la zona. Dicha alternancia no parece estar controlada únicamente por los cambios en el viento a escalas de tiempo diarias.
- La metodología creada para la edición de los datos originales con la finalidad de poder estudiar la corriente geostrófica superficial ha sido eficaz, ya que ha dado lugar a datos de ADT y SAGC muy coherentes, sin embargo, presenta el inconveniente de eliminar demasiadas medidas en la cercanía a costa en determinadas trazas, por lo que se pierde información de la circulación superficial costera. Por tanto, sería interesante la optimización de dicha metodología mediante la comparación con medidas *in situ* que permitan establecer una distancia límite a partir de la costa desde la cual tomar los datos como válidos.
- A pesar de que los resultados de la validación de los datos de ADT generados han sido satisfactorios, resultaría conveniente poder compararlos con datos de

medidas *in situ* de nivel del mar, en lugar de con datos de SST, ya que la validación ha sido únicamente cualitativa. De la misma forma, sería de gran valor la validación de los valores de SAGC obtenidos con medidas de corriente superficial.

5. REFERENCIAS

- Ambar, I., Serra, N., Neves, F. and Ferreira, T. (2008). Observations of the Mediterranean Undercurrent and eddies in the Gulf of Cadiz during 2001. *Journal of Marine Systems*, 71(1-2), pp.195-220.
- Barale, V., Gower, J. and Alberotanza, L. (2010). *Oceanography from space*. Dordrecht: Springer.
- Bouffard, J., Pascual, A., Ruiz, S., Faugère, Y. and Tintoré, J. (2010). Coastal and mesoscale dynamics characterization using altimetry and gliders: A case study in the Balearic Sea. *Journal of Geophysical Research*, 115(C10).
- Bouffard, J., S. Vignudelli, P. Cipollini, and Y. Menard (2008), Exploiting the potential of an improved multimission altimetric data set over the coastal ocean, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L10601, doi:10.1029/ 2008GL033488.
- Buckingham, C. and Cornillon, P. (2013). The contribution of eddies to striations in absolute dynamic topography. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 118(1), pp.448-461.
- Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Navarro, G. and Ruiz, J. (2009). Seasonal and interannual variability of the surface circulation in the eastern Gulf of Cadiz (SW Iberia). *Journal of Geophysical Research*, 114(C1).
- Criado-Aldeanueva, F., García-Lafuente, J., Vargas, J., Del Río, J., Vázquez, A., Reul, A. and Sánchez, A. (2006). Distribution and circulation of water masses in the Gulf of Cadiz from in situ observations. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 53(11-13), pp.1144-1160.
- Earth.esa.int. (2018). *CryoSat-2 - eoPortal Directory - Satellite Missions*. [online] Available at: <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions/c-missions/cryosat-2> [Accessed 2 Jun. 2018].
- Garel, E., Laiz, I., Drago, T. and Relvas, P. (2016). Characterisation of coastal counter-currents on the inner shelf of the Gulf of Cadiz. *Journal of Marine Systems*, 155, pp.19-34.
- Gómez-Enri, J., Vignudelli, S., Cipollini, P., Coca, J. and González, C. (2018). Validation of CryoSat-2 SIRAL sea level data in the eastern continental shelf of the Gulf of Cadiz (Spain). *Advances in Space Research*, 62(6), pp.1405-1420.

- González-Haro, C. and Isern-Fontanet, J. (2014). Global ocean current reconstruction from altimetric and microwave SST measurements. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119(6), pp.3378-3391.
- Laiz, I., Gómez-Enri, J., Tejedor, B., Aboitiz, A. and Villares, P. (2013). Seasonal sea level variations in the gulf of Cadiz continental shelf from in-situ measurements and satellite altimetry. *Continental Shelf Research*, 53, pp.77-88.
- Morrow, R., Carret, A., Birol, F., Nino, F., Valladeau, G., Boy, F., Bachelier, C. and Zakardjian, B. (2017). Observability of fine-scale ocean dynamics in the northwestern Mediterranean Sea. *Ocean Science*, 13(1), pp.13-29.
- Peliz, A., Dubert, J., Marchesiello, P. and Teles-Machado, A. (2007). Surface circulation in the Gulf of Cadiz: Model and mean flow structure. *Journal of Geophysical Research*, 112(C11).
- Pinardi, N., Pistoia, J. and Cipollini, P. (2017). *Coastal altimetry for the computation of a Mean Dynamic Topography in the Mediterranean sea*. Alma Mater Studiorum - Università di Bologna.
- Pisano, A., Buongiorno Nardelli, B., Tronconi, C. and Santoleri, R. (2016). The new Mediterranean optimally interpolated pathfinder AVHRR SST Dataset (1982–2012). *Remote Sensing of Environment*, 176, pp.107-116.
- Prieto, L., Navarro, G., Rodríguez-Gálvez, S., Huertas, I., Naranjo, J. and Ruiz, J. (2009). Oceanographic and meteorological forcing of the pelagic ecosystem on the Gulf of Cadiz shelf (SW Iberian Peninsula). *Continental Shelf Research*, 29(17), pp.2122-2137.
- Puertos.es. (2018). *Predicción de oleaje, nivel del mar; Boyas y mareógrafos (puertos.es)* [online] Available at: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/portus.aspx> [Accessed 13 Sep. 2018].
- Relvas, P. (2002). Mesoscale patterns in the Cape São Vicente (Iberian Peninsula) upwelling region. *Journal of Geophysical Research*, 107(C10).
- Rio, M., Poulain, P., Pascual, A., Mauri, E., Larnicol, G. and Santoleri, R. (2007). A Mean Dynamic Topography of the Mediterranean Sea computed from altimetric data, in-situ measurements and a general circulation model. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4), pp.484-508.
- Troupin, C., Pascual, A., Valladeau, G., Pujol, I., Lana, A., Heslop, E., Ruiz, S., Torner, M., Picot, N. and Tintoré, J. (2015). Illustration of the emerging capabilities

of SARAL/AltiKa in the coastal zone using a multi-platform approach. *Advances in Space Research*, 55(1), pp.51-59.

- Yu, Y., Wang, L., Zheng, Q. and Li, Z. (2014). Geostrophic current estimation using altimetric cross-track method in northwest Pacific. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 17, p.012105.

6. ANEXOS

Anexo 1: Script de MATLAB desarrollado para llevar a cabo la metodología del cálculo de la corriente geostrófica a partir de datos altimétricos de nivel 2 de procesamiento.

```
cd C:\Users\rober\Desktop\CCMar\2017.2018\TFG\Datos\L2

files = dir('*.nc');
a=1; %número del archivo a utilizar, del 1 al 88 y ordenados por fecha

SLA(:,1)=ncread(files(a).name,'SLA_20Hz'); %Extracción de la variable SLA del
fichero original
SLAWN = SLA(all(~isnan(SLA),2),:); %Eliminación de valores NaN de la SLA
SLA_coef=SLAWN;

%Eliminación de valores anómalos de la traza aplicando el coeficiente 3 veces la
Desviación estándar de
%forma iterativa 10 veces para los 100 valores (aprox. 33 km)
%más cercanos a la costa.

for i=1:10
coeff = 3*std(SLA_coef);
SLA_coef((abs(SLA_coef(:,1))>coeff==1),:)=[];
end

limit=coeff;
outliers=(abs(SLAWN(1:100)))>limit;
SLA_edit=SLAWN;
SLA_edit(outliers)=10;
vector=find(SLA_edit==10);
start=max(vector);
SLA_edit=SLA_edit(start+1:end);

k=length(SLA)-length(SLA_edit);

SLA_smooth=smooth(SLA_edit,142,'loess');%filtro LOESS de 50km sobre la SLA sin
valores anómalos

% Extracción del resto de variables de interés de los archivos originales,

lat(:,1)=ncread(files(a).name,'latitude_20Hz');
lat=lat(k+1:end);
top_lat=find(lat<=36.000);
top=min(top_lat);
lat=lat(1:top);

SLA_smooth=SLA_smooth(1:top);

lon(:,1)=ncread(files(a).name,'longitude_20Hz');
lon=lon(k+1:end);
lon=lon(1:top);
```

```

dist_coast(:,1)=ncread(files(a).name,'Dist2coast_20Hz');
dist_coast=dist_coast(k+1:end);
dist_coast=dist_coast(1:top);

```

```

MSSH(:,1)=ncread(files(a).name,'MSS_20Hz');
MSSH=MSSH(k+1:end);
MSSH=MSSH(1:top);

```

```

SSH(:,1)=ncread(files(a).name,'SSH_20Hz');
SSH=SSH(k+1:end);
SSH=SSH(1:top);

```

```

geod=ncread(files(a).name,'EGM_2008_20Hz');
geod=geod(k+1:end);
geod=geod(1:top);

```

```

bathy(:,1)=ncread(files(a).name,'Bathymetry_20Hz');
bathy=bathy(k+1:end);
bathy=bathy(1:top);

```

```

%Cálculo del MDT

```

```

MDT=(MSSH)-(geod);

```

```

%Cálculo del ADT

```

```

ADT = SLA_smooth + MDT_smooth;

```

```

%calculo corriente geostrofica a partir del vector ADT utilizando la ecuación de
geostrofia con diferencias

```

```

%finitas en lugar de diferenciales

```

```

m = size(ADT);

```

```

g = 9.81; %Aceleracion de la gravedad

```

```

f = 2*(2*pi/86400)*sind(lat(2:m-1)); %Parametro de Coriolis

```

```

sf= 110000;%Equivalencia grados de latitud en metros

```

```

dy = sf*(lat(3:m) - lat(1:m-2))/2;%Diferenciales de Y calculados como diferencias
finitas

```

```

dADT = ((ADT(3:m) - ADT(1:m-2)))/2;%Diferenciales de ADT calculados como diferencias
finitas

```

```

gf=(-1*g./f);

```

```

c=(dADT./dy);

```

```

SAGC(2:m-1) = gf.*c; %Surface Absolute Geostrophic Current

```

```

%Cálculo de las componentes U y V de la corriente geostrofica absoluta

```

```

%superficial calculada

```

```

comp_u=(SAGC)*cos(88);

```

```

comp_v=(SAGC)*sin(88);

```

```

comp_u_final=comp_u;

```

```

comp_v_final=comp_v;

```

Anexo 2:

(a) Variables originales presentes en cada uno de los ficheros de datos altimétricos para las diferentes trazas:

longitude_20Hz: 'Geocentric Longitude at 20 Hz'

latitude_20Hz: 'Geodetic Latitude at 20 Hz'

MSS_20Hz: ' Mean Sea Surface at 20 Hz (DTU 2013)'

EGM_2008_20Hz: 'EGM 2008 (Earth Gravitational Model) Geoid Height at 20 Hz'

SLA_20Hz: ' Sea Level Anomaly at 20 Hz '

Dist2coast_20Hz: 'Distance to Coast at 20 Hz'

(b) Variables originales presentes en cada uno de los ficheros de datos de SST para los diferentes días:

lat: 'Latitude geographical coordinates, WGS84 (World Geodetic System 1984) projection'

lon: 'Longitude geographical coordinates, WGS84 projection'

analysed_sst: 'analysed sea surface temperatura (Optimal interpolation (OI) sst measurements from daily Pathfinder L3S, 0.0417 deg; Interim product based on locally bias-adjusted SST_MED_SST_L4_NRT_OBSERVATIONS)'

Anexo 3: Generación de un meddy que dio lugar a una masa de agua con vorticidad negativa (giro anticiclónico) en la zona de estudio. Se muestran datos de SLA grillados para varios días del periodo comprendido entre el 11/05/2012 y el 28/05/2012 (Figuras elaboradas con la herramienta de visualización y análisis Ferret).

